台灣農業研究 (J. Taiwan Agric. Res.) 72(4):317–332 (2023)
https://doi.org/10.6156/JTAR.202312_72(4).0003 研究報告

少根紫萍 (*Landoltia punctata*) 在養豬放流水中的生長評估

林柏文[1] 張淑貞[2,*] 李艷琪[3] 陳琦玲[4] 石憲宗[5]

摘要

林柏文、張淑貞、李艷琪、陳琦玲、石憲宗。2023。少根紫萍 (*Landoltia punctata*) 在養豬放流水中的生長評估。台灣農業研究 72(4):317–332。

浮萍 (duckweed) 生長快速、富含蛋白質，常被應用在工業、畜牧業、食品業及生活廢水的淨化，可有效去除水體中的氮與磷。本研究評估少根紫萍 (*Landoltia punctata*) 養殖於養豬放流水 (SW-I 與 SW-II) 的生長情形與水質變化，及其於濱海魚塭的生長評估。於耐受性評估中，少根紫萍養殖於以 reverse osmosis (RO) 水稀釋成不同倍數的 SW-I 中，1 wk 後 SW-I 的電導度 (electrical conductivity; EC) 值減少 27−52%，pH 值提高至 9.1−9.9，以 RO 水稀釋至 40× 體積的 SW-I 顯著促進少根紫萍生長，鮮重增加 1.7 倍。若以 EC 值達 1,696 μS cm^{-1} 的當地地下水稀釋成不同倍數的 SW-II，作為栽培試驗之生長水體，預測在稀釋至 70.6× 體積的 SW-II 時有最佳鮮重；而在稀釋至 109.9× 體積的 SW-II 時，健康葉狀體面積百分率可達 92.5%，與純地下水養殖的少根紫萍處理無顯著差異。在濱海魚塭的瀝水籃中投放 30% 初始生長面積的少根紫萍，於日均溫較高且日均風速小時，1 wk 內植體生長速率達 2.8 mg cm^{-2} d^{-1}。上述試驗結果皆可作為未來少根紫萍量產參考，以期後續可應用為動物飼料與生質燃料原料。

關鍵詞：浮萍、循環農業、生物復育、替代蛋白。

前言

台灣養豬產業年產值逐年提升，截至 2021 年已近 767 億元，2022 年 11 月底全台養豬達 531 萬頭，每天產生 106,200 m^3 的糞尿 (Council of Agriculture 2022, 2023)。為維護養豬場衛生，常以大量的水沖洗豬舍糞尿，後續產生之糞尿廢水為有機廢水，經農業部多年輔導，養豬場多採用三段式廢水處理系統，以達到『水汙染防治法』的放流水標準，即生化需氧量 (biochemical oxygen demand; BOD) 低於 80 mg L^{-1}、化學需氧量 (chemical oxygen demand; COD) 低於 600 mg L^{-1} 及懸浮固體 (suspended solids; SS) 低於 150 mg L^{-1}，雖然廢水可藉由延長厭氧處理與好氣處理而達上述標準 (Su *et al*. 2020)，放流水所含總氮與總磷濃度亦能有效降低，然其濃度仍分別維持在 54−164 mg L^{-1} 與 23−25 mg L^{-1} 的範圍 (Tsai & Chou 2005)，顯示放流水體仍具一定程度的營養成分。為符合台灣環境部『水污染防治措施及檢測申報管理辦法』的畜牧糞尿資源化處理措施，放流水進入灌排系統後，可再被導入農田以澆灌作物 (Chen *et al*. 2018a)。然而，放流水電導度 (electrical conductivity; EC) 常高於 2,000 μS cm^{-1}，超過『灌溉用水水質標準』750 μS cm^{-1} 的上限 (Koh *et al*. 2004)，故畜牧糞尿的再利用，須依國內農地土壤性質與農作物之耐受度進行調整，例

投稿日期：2023 年 7 月 28 日；接受日期：2023 年 10 月 2 日。
[*] 通訊作者：scchang@tari.gov.tw
[1] 農業部農業試驗所應用動物組助理研究員。台灣 台中市。
[2] 農業部農業試驗所應用動物組副研究員。台灣 台中市。
[3] 農業部農業試驗所農業化學組助理研究員。台灣 台中市。
[4] 農業部農業試驗所農業化學組研究員。台灣 台中市。
[5] 農業部農業試驗所應用動物組研究員兼組長。台灣 台中市。

如 Huang (2013) 將養豬廢水導入人工濕地，透過栽培空心菜 (*Ipomoea aquatica* Forsk.) 與布袋蓮 (*Pontederia crassipes* Mart.) 去除水體中的氮。

此外，浮萍 (duckweed) 因具廣泛分布與適應的特性，常被應用在工業、畜牧業、食品業及生活等廢水的淨化 (Goopy *et al*. 2004; Mohedano *et al*. 2014; Devlamynck *et al*. 2021)。浮萍為水生漂浮植物，屬於天南星科 (Araceae) 的浮萍亞科 (Lemnoideae)，已記錄至少 5 屬 36 種，通常生活在池塘或湖泊中，世界各地除極地以外皆可見其蹤跡，由於其生長與繁殖速度快，具廣泛的適應能力 (Baek *et al*. 2021)；另 Toyama *et al*. (2018) 指出浮萍對水中無機鹽類具有良好的吸收能力，可被應用於處理家庭與養豬廢水，如水萍 (*Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid.)、小葉浮萍 (*Lemna minor* L.)、腫浮萍 (*Lemna gibba* L.) 及少根紫萍 (*Landoltia punctata* (G. Mey.) Les & D. J. Crawford) 可於 4 d 內有效移除養豬放流水中的氮。雖然少根紫萍於冬季時對廢水的淨化效率較差，但總氮去除率仍逾 50% (Huang 2008)。而 Mohedano *et al*. (2012) 於巴西的畜牧場，以面積合計 237 m^2 的雙水池利用養豬放流水養殖少根紫萍，顯示其可分別去除水體中 96% 氮與 89% 磷，且植體乾重產量達 55.3 Mg ha^{-1} yr^{-1}，少根紫萍生長於含氮與磷較高的水體時，其粗蛋白質平均含量可逾 35%，為蛋白質含量豐富的植物。

將浮萍整合至養豬場域的系統，有助於生態循環，減少營養物質在農業生產中的損耗，浮萍亦可作為動物飼料原料，能減緩飼料原料價格波動對產業所產生的負面影響 (Gwaze & Mwale 2015)。在美國 (Moss 1999)、墨西哥 (Gutiérrez *et al*. 2001)、英國 (Tallentire *et al*. 2018)、德國 (Demann *et al*. 2023)、荷蘭 (El-Shafai *et al*. 2004; van der Spiegel *et al*. 2013)、波蘭 (Sońta *et al*. 2019)、韓國 (Baek *et al*. 2021)、孟加拉 (Islam *et al*. 1997; Azim & Wahab 2003)、台灣 (Lin *et al*. 2015; Tsai 2019)、衣索比亞 (Gule *et al*. 2023)、南非 (Mwale & Gwaze 2013; Gwaze & Mwale 2015) 及澳洲 (Leng *et al*. 1995; Damry *et al*. 2001; Goopy & Murray 2003; Brown *et al*. 2013) 等國的研究，普遍關注浮萍作為動物食物其營養價值與經濟效益研究評估，此有助於加速推動浮萍成為陸生或水產養殖動物飼料原料的應用。由既有研究可知，浮萍於仔豬飼料的添加量，一般不超過總量 10% (Gutiérrez *et al*. 2001)，可取代飼料中的大豆粕比例則高達 20% (Moss 1999)；Leng *et al*. (1995) 指出傳統上浮萍可用來餵食草魚 (*Ctenopharyngodon idella* (Valenciennes)) 與尼羅口孵非鯽 (*Oreochromis niloticus* (L.))，而 Tsai (2019) 則發現可以使用小葉浮萍餵食紅尼羅魚 (*Oreochromis* spp.)，可替代飼料總量之 16.5%。值得注意的是，浮萍單位面積的蛋白質產量，高於大豆、水稻及玉米，特別適合用來提高非作物栽培區的生產力 (Baek *et al*. 2021)，顯示浮萍類植物具有作為家畜、家禽及水產等養殖動物飼料的潛力，以替代大豆與玉米等傳統的植物性蛋白質飼料原料。

本研究擬探討少根紫萍在養豬放流水體之養殖條件，並評估其在海濱畜牧場環境量產的可行性，以期建立浮萍在畜牧場的量產方法。未來將可應用此浮萍取代部分動物飼料中的植物性蛋白，具體呈現循環農業概念，更能避免受制於國際上大豆等作物價格波動的影響，進而有效解決國內動物飼料價格上揚的產業問題。

材料與方法

浮萍培養與種類鑑定

自南投縣埔里鎮茭白筍田採集浮萍，清洗後浸於 1% $NaClO_{(aq)}$ 30 s，再以逆滲透 (reverse osmosis; RO) 水浸洗 3 次，每次 1 min；將浮萍移至 1/2 Hoagland E 培養液 (Hoagland E medium; HEM)，於 25 ± 1℃、8 h/16 h 光暗週期下馴養，每週更換 1 次培養液 (Wu *et al*. 2009)，並初步依其葉背顏色與根系形態進行分離培養 (Yang 2000)。

再以最適用於浮萍種類鑑定的 ATP 基因的非轉錄區序列進行浮萍種類鑑定 (Wang *et al*. 2010)。首先將 20 mg 浮萍放入 1.5 mL 微量離心管中，以丟棄式研磨棒磨碎後，應用 EDNA HiSpEx Plant Kit (Fisher Biotec, Wem-

bley, Australia) 萃取其 DNA；取 2 μL DNA 萃取液與 1 μL 引子對 (atp-F: 5′-ACTCGCACACACTCCCTTTCC-3′、atp-H: 5′-GCTTTTATGGAAGCTTTAACAAT-3′，各 10 pmoles)、10 μL 2X EmeraldAmp MAX HS PCR Master Mix (Takara Bio Inc., Shiga, Japan) 及 7 μL ddH$_2$O 混合後以聚合酶連鎖反應儀 (GeneAmp® PCR System 2400, PerkinElmer, Inc., Shelton, CT, USA) 進行 polymerase chain reaction (PCR)。PCR 條件：於 94℃ 2 min、60℃ 1 min 及 72℃ 1 min，接著在 95℃、53℃及 72℃各 30 s 的設定下循環 30 次，最後於 72℃ 7 min。繼以 TOPO TA Cloning Kit (Invitrogen, Waltham, MA, USA) 進行 PCR 產物選殖，再送交源資國際生物科技股份有限公司 (Tri-I Biotech Inc., Taichung, Taiwan) 以核酸分析儀 (ABI 3730 DNA Analyzer, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA) 定序。所得序列以 Vector NTI® Suite 9.0 軟體 (Invitrogen, Waltham, MA, USA) 之 ContigExpress™ 程式進行整理；最後應用 Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) (National Center for Biotechnology Information, Bethesda, MD, USA) 與 GenBank 資料庫比對 ATP 基因的非轉錄區序列，以確認浮萍種類。

養豬放流水取樣與水質分析

養豬放流水 I (swine waste water I; SW-I) 與養豬放流水 II (swine waste water II; SW-II) 取自彰化縣芳苑鄉的 2 處不同畜牧場的放流口，座標分別為 23°59'44.5"N、120°22'00.3"E 與 23°58'45.8"N、120°20'35.5"E，並自後者座標所在位置，採取當地地下水 (local groundwater; LGW)。水體樣本密封並冷藏於 4℃下備用。

樣本水質依據環境部公告之方法檢測 (NIEA W203.51B、NIEA W424.53A、NIEA W444.51C、NIEA W448.51B 及 NIEA W452.5)。以多功能水質測試儀 (MultiLine® Multi 3630 IDS Multi-Parameter Portable Meter, WTW, London, UK) 測定水中氫離子濃度指數 (pH 值) 與 EC；樣本經孔徑 8 μm 濾紙 (Whatman® qualitative filter paper, Grade 2, Cytiva, Marlborough, MA, USA) 過濾後，以自動化學分析儀 (Astoria Analyzer, Astoria-Pacific, Inc, Clackamas, OR, USA) 進行流動注入分析 (flow injection analysis; FIA)，測定氨態氮 (NH_3-N)、硝酸態氮 (NO_3^- -N) 及總磷。

葉狀體尺寸量化與健康判定

為快速且合理地計算少根紫萍葉狀體面積，葉狀體依長度區分成大片 2.4−3.4 mm、中片 1.4−2.4 mm、小片 0.4−1.4 mm 及特小片 < 0.4 mm 等肉眼可明顯區分的 4 類尺寸，特小片葉狀體不列入後續計算。分別自大、中及小片尺寸的葉狀體隨機取樣 10 片，以解剖顯微鏡 (SteREO Discovery.V20 microscope, Carl Zeiss AG, Württemberg, Germany) 與影像擷取軟體 (Tekfar Digital Camera XCAM4L8MPB and TekfarProVision X64,4.11.20314.20220220, Tekfar Science Co., Ltd., Tainan, Taiwan) 量測葉面長度，接著應用圖像處理軟體 (ImageJ 1.54d version, National Institutes of Health, Bethesda, ML, USA) 計算葉狀體面積，並進行葉狀體長度與面積的直線迴歸分析。後續以大、中及小片長度的中位數 2.9、1.9 及 0.9 mm 代入迴歸方程式，可得到各尺寸葉狀體的中位數面積。

在判定葉狀體健康的方面，若單一葉狀體的面積有 50% 以上出現缺綠 (chlorosis) 或組織浸離 (maceration)，則歸為非健康葉狀體。後續試驗僅須判定葉狀體尺寸類別與健康情形，即可瞭解各處理少根紫萍葉狀體健康面積占比，本研究推估少根紫萍健康葉狀體面積百分率 (%) = [Σ(各尺寸中位數面積 × 該尺寸健康葉狀體數) ÷ Σ(各尺寸中位數面積 × 該尺寸總葉狀體數)] × 100%。

少根紫萍對養豬放流水的耐受性評估

為評估少根紫萍對養豬放流水的耐受性，將 SW-I 以 RO 水稀釋至 1× (原液)、4×、10× 及 40× 體積等 4 種水體，分別取 200 mL 水體至圓形塑膠盒 (diameter = 8.67 cm、area = 59.05 cm^2)，再投放 20 片總重為 17.4 ± 0.3 mg 的少根紫萍，於 25 ± 1℃、8 h/16 h 光暗週期下培養 1 wk 後，以手持式電導度檢測計

(Eutech^{TM} ECTestr11 Dual Range Conductivity Tester, Thermo Fisher Scientific, Inc., Waltham, MA, USA) 與酸鹼值檢測計 (Eutech^{TM} pHTestr 10 pH Meter, Thermo Fisher Scientific, Inc., Waltham, MA, USA) 分別檢測水體 EC 值與 pH 值，並以衛生紙吸去多餘水分，再秤得植體鮮重，試驗重複 5 次。

地下水稀釋養豬放流水之栽培試驗

試驗分 2 階段進行，第 1 階段是低度稀釋 SW-II 之栽培試驗，第 2 階段則為高度稀釋 SW-II 之栽培試驗。第 1 階段試驗將 SW-II 以 LGW 分別稀釋至 20×、40×、60× 及 80× 體積等 4 種水體，再各取 200 mL 加入至圓形塑膠盒，並投入鮮重 100 mg 的少根紫萍，於 25 ± 1℃、8 h/16 h 光暗週期下培養 1 wk 後，檢測水體 EC 值與 pH 值，並以解剖顯微鏡觀察葉狀體健康情形，同時以影像擷取設備拍照，最後以衛生紙吸去葉狀體上的多餘水分，秤量植體鮮重，試驗重複 5 次。第 2 階段試驗將 SW-II 以 LGW 分別稀釋至 80×、100× 及 200× 體積等 3 種水體，其餘流程同上，1 wk 後記錄少根紫萍的健康情形與鮮重，試驗重複 5 次。

少根紫萍在濱海魚塭場域的生長評估

為利計算少根紫萍初始投放面積，須瞭解紫萍投放密度與植體鮮重的關係。將 5 L 的地下水裝於黃色塑膠盆 (密林 500 盆) 中，此時水表面積為 1,200.31 cm^2，接著投入少根紫萍，1 h 後紫萍會擴散於水面，陸續將紫萍流入以保麗龍板區隔出的 40% 面積區域裡，直到該區域的水表被葉狀體上下不重疊的紫萍填滿，再以 30 目不鏽鋼標準篩收集該區域的紫萍，並瀝除自由水，以衛生紙吸去葉狀體表面的水分後，秤植體鮮重，試驗重複 5 次，最後計算出投放密度係數，以作為投放面積的參考，投放密度係數 (mg cm^{-2}) = 植體鮮重 ÷ 生長水表面積。

接著評估少根紫萍量產的可行性，選定彰化縣芳苑鄉與養豬場比鄰的濱海魚塭場域 (area = 509.18 m^2)，座標為 23°58'44.8"N、120°20'34.9"E，每週注入 3.06 m^3 的養豬放流水，並注入 100× 體積的地下水，此時水池深約 0.6 m。將瀝水籃 (diameter = 22.4 cm、area = 394.08 cm^2) 固定並漂浮於場域水面，再投放 10% 或 30% 初始生長面積的少根紫萍，1 wk 後完成 1 次養殖週期，最後收穫植體並秤重，共有 I、II、III、IV 及 V 等 5 個養殖週期，每個週期皆計算植體生長速率，同時收集場域附近的交通部中央氣象局王功漁港氣象站 (23°58'5.7"N、120°19'33.1"E) 的日均溫、日均風速及日降雨量，試驗期間為 2022 年 11 月 2 日至 12 月 7 日。

統計分析方法

數據統計以 Statistical Product and Service Solutions 26 (SPSS 26, IBM, New York, NY, USA) 軟體進行分析。在迴歸分析 (regression analysis) 中，以線性或二次模型進行估計，若具顯著性 ($P < 0.05$)，則以該模型解釋自變數與應變數的關係。在多重比較法中，先以雷文檢定 (Levene's test) 判別變異數是否具同質性 (equality of variances)，若未達顯著 ($P <$ 0.05)，則進一步使用變異數分析 (analysis of variance; ANOVA)，達顯著時 ($P > 0.05$)，使用事後 (post hoc) 檢定中的最小顯著差異性測驗 (Fisher's protected least significant difference (LSD) test) 進行分析。

結果

茭白筍田的浮萍種類

以 atp-F/atp-H 引子對增幅 2 種浮萍的 ATP 基因的非轉錄區並利用 BLAST 分析後，茭白筍田的浮萍優勢種序列長度為 727 bp，與中國的少根紫萍 (*Landoltia punctata*) (GenBank: KJ630555) 序列完全相同，且葉片倒卵形至橢圓形，葉狀體表面淺綠至深綠色，葉狀體邊緣與腹面則呈紅紫色，有 3−5 條根 (圖 1A)；序列長度為 690 bp 的浮萍族群較少，與中國的青萍 (*Lemna aequinoctialis*) (GenBank: KJ630511) 序列有 98.8% 的相似度，葉狀體長橢圓形，表面、邊緣及腹面呈綠色，僅 1 條根 (圖 1B)。故推論茭白筍田中族群數量較少的浮萍種類為青萍，並取優勢種少根紫萍進行後續試驗。

養豬放流水與 LGW 水質

SW-I、SW-II 及 LGW 均取自芳苑濱海地區，pH 值介在 7.6−7.9 (表 1)。SW-I 與 SW-II 的 EC 值高達 5,010−5,120 μS cm^{-1}，LGW 則為 1,696 μS cm^{-1}，皆超過 1/2 HEM 的 EC 值與灌溉水質基準值 (EC < 750 μS cm^{-1})。相對 1/2 HEM，SW-I 與 SW-II 為富含更多的氮與磷之水體，兩者的總氮濃度分別為 465.0 與 177.0 mg L^{-1}，而總磷濃度分別為 18.8 與 28.7 mg L^{-1}。

葉狀體各尺寸的面積

隨著少根紫萍葉狀體長度的增加，葉面積亦隨之變大，直線迴歸方程式為 $y = 1.4541x - 0.6063$ ($R^2 = 0.9404$) (圖 2)，二者高度相關。應用葉狀體各尺寸長度的中位數，經此直線迴歸方程式，計算出大、中及小片葉狀體面積分別為 3.61、2.16 及 0.70 mm^2，該數據可應用於健康葉狀體面積百分率，快速且合理地計算出各處理少根紫萍葉狀體的健康面積占比。

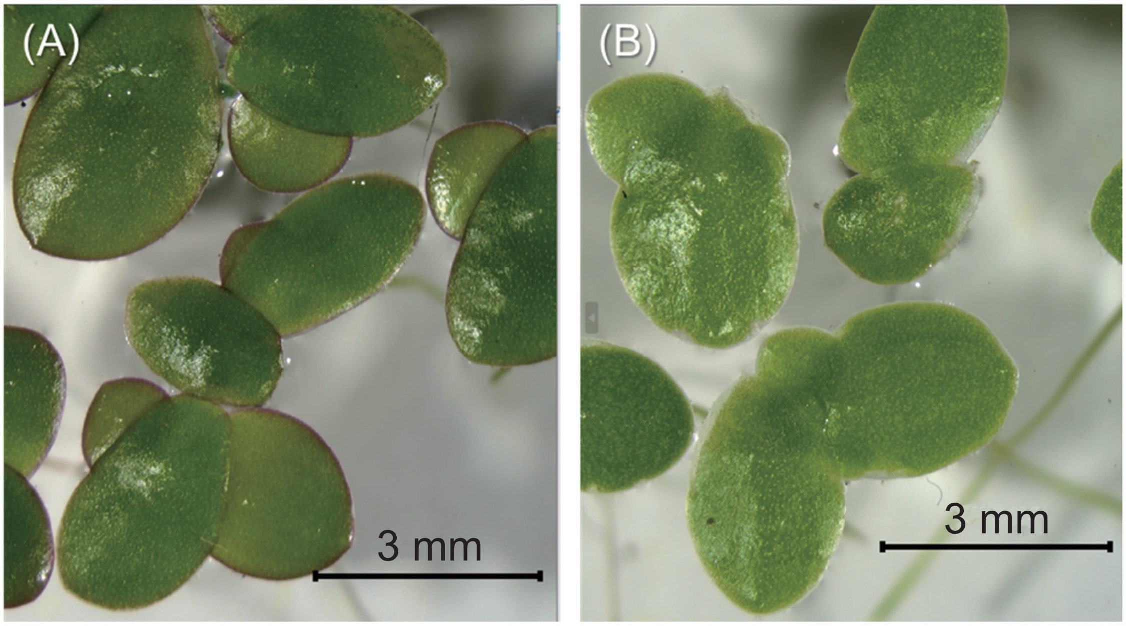

圖 1. 浮萍葉狀體外觀：(A) 少根紫萍與 (B) 青萍。圖中比例尺為實際長度的 3 mm。

Fig. 1. The appearance of duckweed fronds: (A) *Landoltia punctata* and (B) *Lemna aequinoctialis*. The scale in the image represents an actual length of 3 mm.

表 1. 彰化縣芳苑鄉養豬場域放流水與地下水的水質。

Table 1. The water quality of swine wastewater and groundwater in the pig farm in Fangyuan Township, Changhua County.

Sample	pH	EC[z] (μS cm^{-1})	Total N (mg L^{-1})	Total P (mg L^{-1})
Swine wastewater I (SW-I)[y]	7.9	5,120	465.0	18.8
Swine wastewater II (SW-II)[x]	7.6	5,010	177.0	28.7
Local groundwater (LGW)[x]	7.6	1,696	2.8	0.3
1/2 Hoagland E-mediun	5.5	557	49.7	3.8

[z] EC: electrical conductivity.
[y] Swine wastewater I was collected in Fangyuan township (23°59'44.5"N, 120°22'00.3"E) on July 6, 2022.
[x] Swine waste water II and local groundwater were collected in Fangyuan Township (23°58'45.8"N, 120°20'35.5"E) on July 19, 2022.

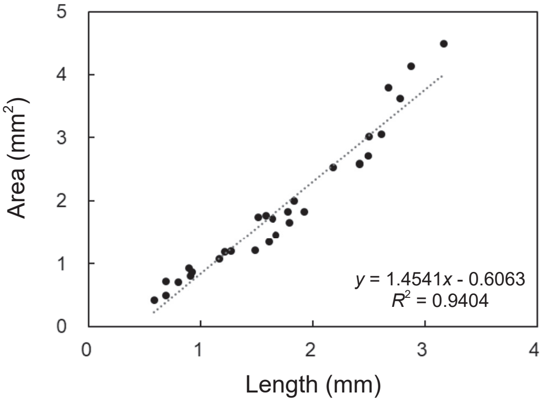

圖 2. 少根紫萍葉狀體長度與面積的關係。從大、中及小片 3 種尺寸各隨機挑選 10 片葉狀體進行長度與面積的量測，每個點代表一片葉狀體的量測值。

Fig. 2. The correlation between frond length and area of *Landoltia punctata*. Ten fronds were randomly selected from each of the three size categories, large, medium, and small, for measurements of length and area. Each point represents a measurement value from an individual frond.

少根紫萍對養豬放流水的耐受性

將 SW-I 以 RO 水分別稀釋成不同倍數的水樣後，投入少根紫萍養殖 1 wk，水樣 EC 值與 pH 值變化如圖 3。不同稀釋倍數的 SW-I 水樣於處理 3 d 後 (day after treatment; DAT) 的 EC 值即顯著降低，而 pH 值則顯著升高；至 7 d 仍維持同樣的趨勢，最終水樣 EC 值較 0 d 時減少 27−52%，且 pH 值高達 9.1−9.9，呈鹼性。

少根紫萍養殖在 1/4 SW-I 與 1 SW-I 水樣中，7 d 後皆已無健康的葉狀體並嚴重缺綠 (圖 4)，甚至在 1 SW-I 水樣中，部分植體沉降於水底；而在 1/10 SW-I 水樣中，葉狀體之間明顯分離，無法有效以枝狀體連結彼此；水體顏色除了未稀釋的養豬放流水 (1 SW-I) 顏色變淡，以及 RO 水處理的水樣無明顯變化外，其他處理的水樣偏綠色，明顯有藻類孳生。在少根紫萍鮮重方面，1/40 SW-I 水樣可促進植體生長，鮮重為 30.2 mg，顯著多於對照組，同時健康葉狀體面積百分率亦可達 98.8%。

地下水稀釋養豬放流水栽培情形

在第 1 階段低度稀釋 SW-II 之栽培試驗中，1/40 與 1/60 SW-II 處理養殖 1 wk 後，部分葉狀體已呈現缺綠或組織浸離 (圖 5A)，在第 2 階段高度稀釋試驗中，各處理葉狀體外觀則無明顯為害狀。2 個階段試驗中，各處理組的植體鮮重皆與對照組無顯著差異 (圖 5B)，但以 1/80 SW-II 處理有最佳葉狀體鮮重的趨勢，以第 1 階段試驗數據進行迴歸分析，不同稀釋倍數 SW-II 與植體鮮重呈現顯著的二次曲線關係 (圖 6A)，其方程式為 $y = -86{,}448x^2 + 2{,}451x + 139$ ($R^2 = 0.9962$)，依此模型推估，SW-II 以 LGW 稀釋至 70.6× 體積，可累積最多植體鮮重。

結合 2 階段試驗數據，不同稀釋倍數 SW-II 與健康葉狀體面積百分率呈現顯著的二次曲線關係 (圖 6B)，其方程式為 $y = -169{,}606x^2 + 1{,}543x + 93$ ($R^2 = 0.8991$)。依此曲線模型可知，對照組的健康葉狀體面積百分率為 92.5%，若以 SW-II 養殖少根紫萍，至少須以 LGW 稀釋至 109.9× 體積，才可達到相同標準。

少根紫萍在濱海魚塭場域的生長情形

少根紫萍於密林 500 盆水面不重疊生長、布滿40% 水表面積時，其重量為 12.88 ± 1.40 g，即投放密度係數為 26.826 mg cm^{-2}，故推算在場域的瀝水籃中投放 10% 或 30% 初始生長面積的少根紫萍時，重量分別為 3.17 g 與 1.06 g。

2022 年於養殖週期 I、II 及 III 投放 30% 初始生長面積的少根紫萍 (圖 7)，1 wk 後鮮重增加率為 177.3−259.7%，尤以養殖週期 II 的紫萍生長表現最好，已完整覆蓋瀝水籃的水面，植體生長速率達 2.8 mg cm^{-2} d^{-1}，換算為 282.4 kg ha^{-1} d^{-1}，相對而言，該批養殖期間的日均溫較高，且日均風速較小、日降雨量較少。於養殖週期 IV 與 V 投放 10% 初始生長面積的少根紫萍，植體生長速率皆小於上述 3 個週期，又以週期 V 最低，僅 0.46 mg cm^{-2} d^{-1}，同時為所有試驗期間，日均溫最低且日均風速較大的養殖週期。

討論

茭白筍田的浮萍主要為少根紫萍與青萍

南投縣埔里鎮茭白筍田中採集到的浮萍優

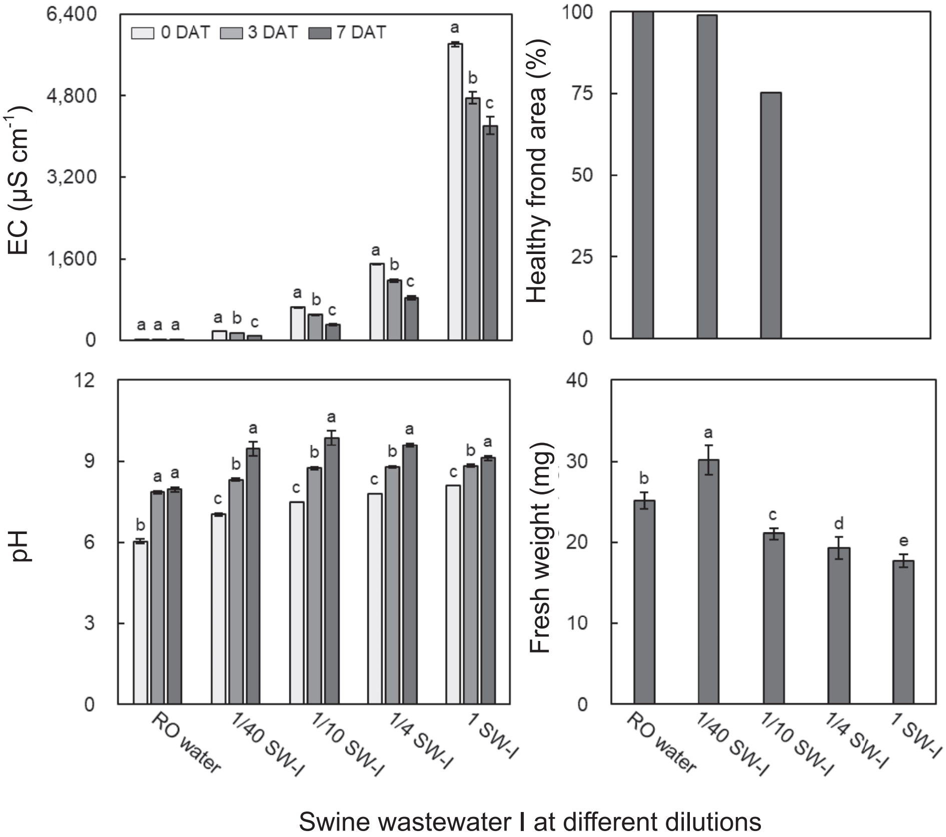

圖 3. 以 reverse osmosis (RO) 水稀釋成不同倍數之養豬放流水 I (SW-I) 養殖少根紫萍後，水體電導度 (electrical conductivity; EC) 與酸鹼度的變化，以及少根紫萍健康葉狀體面積與植體鮮重的差異。數據以最小顯著差異性測驗進行統計分析，不同英文字母代表處理間具有顯著差異 ($P < 0.05$)，誤差線代表 5 次重複試驗的標準差。

Fig. 3. Variations in electrical conductivity and pH of water samples, and differences in healthy frond area and fresh weight of *Landoltia punctata* cultivated in swine wastewater I (SW-I) diluted to different multiples with reverse osmosis (RO) water. Statistical analysis was conducted using the Fisher's protected least significant difference (LSD) test, where different English letters represent significant differences ($P < 0.05$), and error bars represent the standard deviation of 5 replicate experiments.

勢種為少根紫萍，另可見部分青萍，兩者皆為全台灣廣泛分布的物種，兩者常混生在一起，但可藉由葉狀體腹面是否呈紫紅色進行區分 (Lin 2022)。本研究準備浮萍材料時，以 1% $NaClO_{(aq)}$ 進行 30 s 的消毒，隔日發現青萍白化，而少根紫萍葉狀體未明顯受損，顯示在氧化逆境下少根紫萍具有較青萍好的耐受性，且 Faizal *et al*. (2021) 在 1/10 HEM 的水體培養浮萍時，少根紫萍的生長速率、澱粉及蛋白質含量表現皆優於青萍，故本研究之後續試驗主要評估少根紫萍於不同濃度養豬放流水的生長情形。

養豬放流水為高 EC 值且高 NH_3-N 濃度的水體

台灣養豬場習慣使用地下水清潔豬舍環境，因此本研究同時於芳苑地區採樣養豬放流水與 LGW，結果顯示其 EC 值皆超過農業部訂定的灌溉水質基準，且養豬放流水的氮幾乎以 NH_3-N 型式 (游離態的 NH_3 與離子態的 NH_4^+) 存在於水體中。Lin & Chang (2015) 檢測台灣養豬放流水與地下水之水質時，其 EC 值亦分別可達 3,290 與 1,210 μS cm^{-1}，由於離子種類與其濃度反應出水體 EC 值大小，

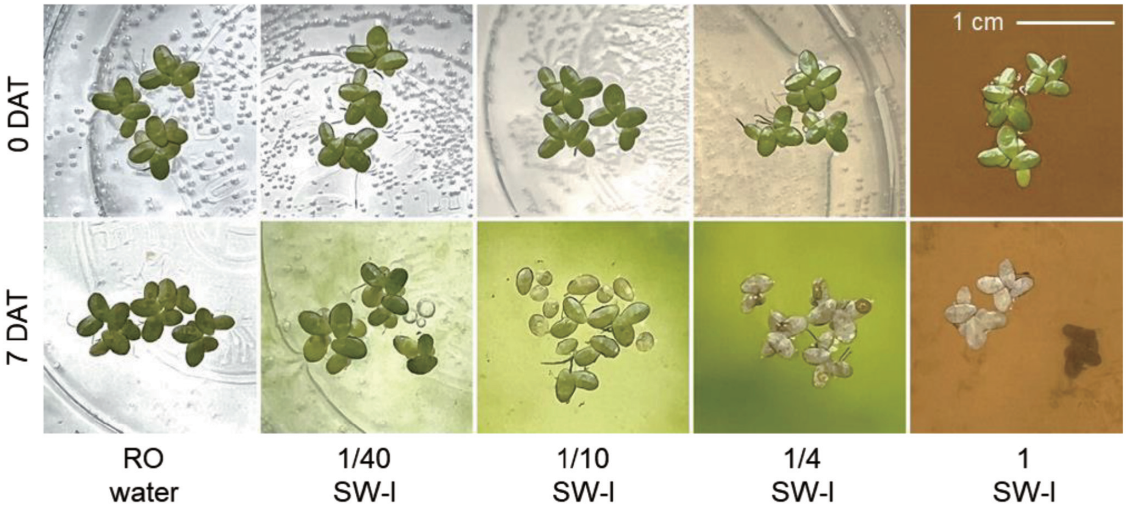

圖 4. 以 reverse osmosis (RO) 水稀釋成不同倍數之養豬放流水 I (SW-I) 養殖少根紫萍 7 d 後，葉狀體外觀與水樣顏色變化。圖中比例尺為實際長度的 1 cm。

Fig. 4. Changes in the frond appearance of *Landoltia punctata* and the color of water samples after 7 d of cultivation in swine wastewater I (SW-I) diluted to different multiples with reverse osmosis (RO) water. The scale in the image represents an actual length of 1 cm. DAT: day after treatment.

作者進一步分析出養豬放流水中的 HCO_3^- 與 CH_3COO^- 約占水體 EC 值的 32%，其次 NH_4^+ 約占 24%，Mg^{2+}、K^+ 及 Cl^- 則各約占 7%，其結果與本研究相符，養豬放流水為高 EC 值且高 NH_3-N 濃度的水體。

少根紫萍生長會使養豬放流水 EC 值下降與 pH 值升高

評估少根紫萍對養豬放流水的耐受性時，不同稀釋倍數之 SW-I 的 EC 值皆隨時間推移而顯著減少。台灣養豬放流水中以 HCO_3^-、CH_3COO^- 及 NH_4^+ 等 3 種離子濃度的多寡對水體 EC 值的變化影響最大 (Lin & Chang 2015)，故推測 SW-I 的 HCO_3^-、CH_3COO^- 及 NH_4^+ 等離子濃度降低。而水體 EC 值下降之因可歸納成 3 種可能：少根紫萍本身可有效率地移除水體中的離子，累積在植體內 (Zhou *et al*. 2023)；於 1/4、1/10 及 1/40 SW-I 明顯有伴生的藻類，與少根紫萍一樣吸收了離子；SW-I 因一連串的生化作用，其 pH 值升高而致水中 NH_4^+ 轉成非離子態氮 (Yu 2010)，如 NH_3 與 N_2O，在越鹼性的水體中，其 NH_3-N 由 NH_3 組成的比例越高，最後更可能造成水中的離子態氮以 NH_3 與 N_2O 的型式排放至大氣中 (Stadtlander *et al*. 2022)。

於不同稀釋倍數之 SW-I 投入少根紫萍養殖 1 wk 後，其 pH 值顯著升高。相同的趨勢亦發生在經小葉浮萍處理的養豬放流水 (Devlamynck *et al*. 2021)，和本研究的 SW-I 與 SW-II 一樣，含氮化合物類型為 NH_3-N，水體隨時間推移，EC 值下降但 pH 值升高。養豬放流水含高濃度的氮與磷元素，有利於藻類生長，本研究亦觀察到 SW-I 與 SW-II 中伴有藻類孳生，故推測水體 pH 值升高與優養化 (eutrophication) 現象相關，在藻類高度光合作用下，導致水體中 HCO_3^- 濃度迅速減少，OH^- 濃度增加，而提高 pH 值 (Verspagen *et al*. 2014)。

少根紫萍耐受性與生長評估

少根紫萍與其他植物一樣可吸收 NH_4^+ 或 NO_3^- 型式的氮，更可藉由根與葉狀體吸收營養元素，尤其偏好吸收 NH_4^+ 型式的氮 (Fang *et al*. 2007)，又 NH_4^+ 為養豬放流水中，氮元素主要存在的型式 (Lin & Chang 2015)，故少根紫萍在特定 NH_3-N 濃度水體生長的情形值得探討。本研究將 SW-I 以 RO 水稀釋至 40×

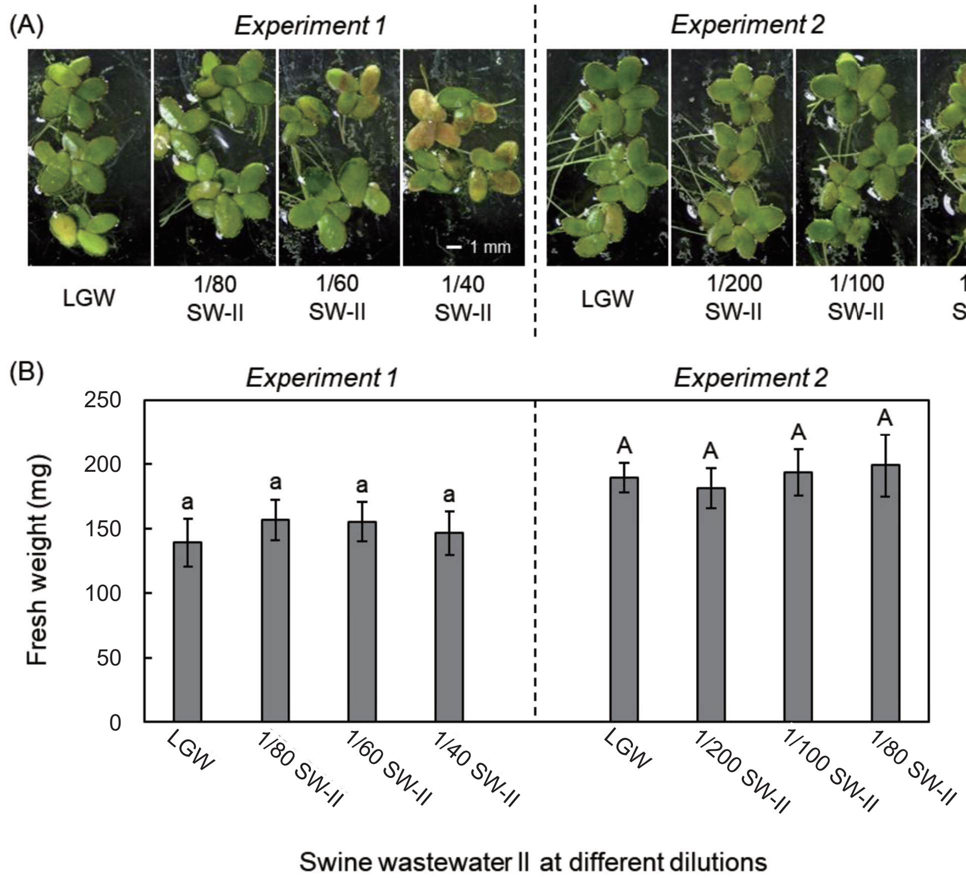

圖 5. 以當地地下水 (local groundwater; LGW) 稀釋成不同倍數之養豬放流水 II (SW-II) 養殖少根紫萍 7 d 後的差異。(A) 葉狀體外觀。圖中比例尺為實際長度的 1 mm。(B) 植體鮮重。數據以最小顯著差異性測驗進行統計分析，相同英文字母代表處理間不具有顯著差異 ($P < 0.05$)，誤差線代表 5 次重複試驗的標準差。

Fig. 5. The differences after 7 d of cultivating *Landoltia punctata* in swine wastewater II (SW-II) diluted to different multiples with local groundwater (LGW). (A) Frond appearance. The scale in the image represents an actual length of 1 mm. (B) Differences in fresh weight. Statistical analysis was conducted using the Fisher's protected least significant difference (LSD) test, where same English letters indicate no significant differences ($P < 0.05$), and error bars represent the standard deviation of 5 replicate experiments.

體積，以原水體換算其總氮含量為 11.6 mg L^{-1} (表 1)，少根紫萍在此水體生長時，葉狀體接近 100% 健康，且其鮮重顯著高於養殖於 RO 水的少根紫萍，但在 1/10 SW-I 或更低度稀釋的處理時，少根紫萍生長明顯受阻。Stadtlander *et al*. (2022) 以少根紫萍處理不同濃度稀釋的牛泥 (cattle slurry)，與本研究結果類似，7 d 後水體 pH 值提升至 8.21−8.83，而水體在 NH_3-N 濃度為 19 mg L^{-1} 時才有最佳鮮重，且並非 NH_3-N 濃度越高，越能促進少根紫萍生長，與本研究結果類似。過高的 NH_3-N 濃度會對少根紫萍的生長產生不良影響，但 Tian *et al*. (2021) 提及，少根紫萍可藉由吸收 K^+，耐受高 NH_4^+ 濃度的毒害，避免陽離子元素缺乏，而能在 400 mg L^{-1} 的 NH_3-N 下生長。

當浮萍生長於高 pH 值水體，對 NH_3-N 的耐受性變差，生長速率減緩 (Körner *et al*. 2003)，如腫浮萍 (*L. gibba*) 因高濃度 NH_4^+ 與 NH_3 所致的毒性，於 pH 值超過 9.8 的家用廢水明顯生長不良，而無法淨化水質 (Körner *et al*. 2001)，故過高的 pH 值水體對浮萍生長有直接的負面影響，更使其不利與藻類競爭

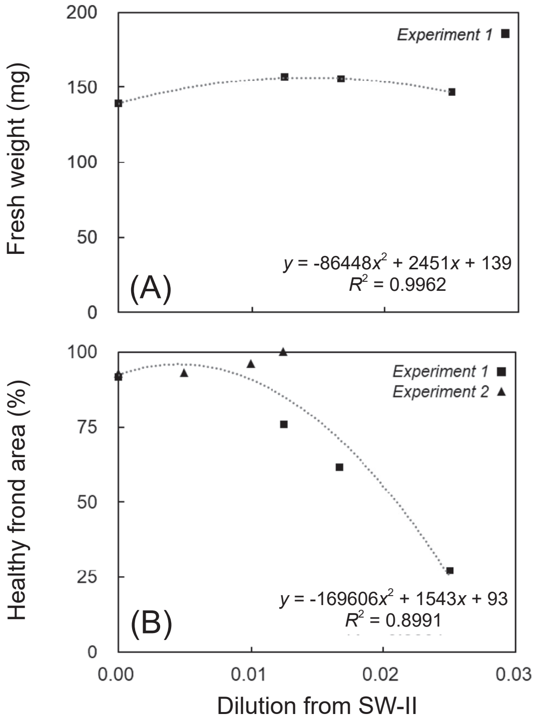

圖 6.　以當地地下水 (LGW) 稀釋成不同倍數之養豬放流水 II (SW-II) 與少根紫萍生長的關係。(A) 植體鮮重。每個點代表 5 次重複試驗的平均值。(B) 健康葉狀體面積。每個點代表 1 次重複試驗 1 處理所有葉狀體的計算值。方形點為第 1 階段低度稀釋試驗之結果，三角形點則為第 2 階段高度稀釋試驗之結果。

Fig. 6.　The correlations between growth of *Landoltia punctata* and swine wastewater II (SW-II) diluted to different multiples with local groundwater (LGW). (A) Fresh weight. Each point represents the mean of 5 replicate experiments. (B) Healthy frond area. Each point represents the calculated value of one replicate experiment for a single treatment involving all fronds. The square points represent the results of the 1st-stage low dilution experiment, and the triangular points represent the results of the 2nd-stage high dilution experiment.

水體營養與生長空間。然而本研究以 RO 水將 SW-I 稀釋至 40× 體積時，最後水體 pH 值達 9.5，其少根紫萍的鮮重顯著多於以 RO 水體養殖的處理，顯示少根紫萍即使養殖於較高 pH 值水體，只要 NH_3-N 濃度適當，其生長情形仍能優於在較低 pH 值且缺乏營養的水體。

將 SW-II 以 EC 值達 1,696 μS cm^{-1} 的 LGW 稀釋至 40×、60×、80×、100× 及 200× 體積，以瞭解少根紫萍的栽培情形時，植體鮮重方面與 LGW 對照組沒有顯著差異，但 2 階段試驗在鮮重方面，皆以 1/80 SW-II 養殖的少根紫萍有最佳的趨勢。進一步以第 1 階段低度稀釋之栽培試驗結果建立曲線模型 (圖 6A)，SW-II 以 LGW 稀釋至 70.6× 體積，應可累積最多植體鮮重，以原水體換算其總氮含量為 2.5 mg L^{-1} (表 1)，然而 SW-I 以 RO 水稀釋的狀況下，則以 40× 體積 (總氮含量 11.6 mg L^{-1}) 最佳。SW-II 以 LGW 稀釋至 70.6× 體積的水體與 SW-I 以 RO 水稀釋至 40× 體積的水體相比，有較高的 EC 值與較低的 NH_3-N 濃度，但都是各自試驗中最適合少根紫萍生長的處理，故初步推論少根紫萍在高 EC 值水體中生長時，對 NH_3-N 的耐受性降低，但仍須後續試驗確認。

另外，考量到葉狀體的健康與否涉及到後續生長速率與量產可行性，僅從鮮重評估少根紫萍的生長情況還不夠全面。因此，本研究進一步分析不同稀釋倍數的 SW-II 與少根紫萍的健康葉狀體面積，發現二者呈現二次曲線關係，綜合考慮植體鮮重與葉狀體健康狀況，如果要在濱海魚塭場域中使用養豬放流水與 LGW 進行少根紫萍的養殖，稀釋倍數應至少為 109.9× 體積，這對該場域中的少根紫萍養殖最適合。然而，考量水資源的節約利用，可適當降低稀釋倍數，如以健康葉狀體面積的 90% 作為標準，則養豬放流水僅須稀釋至 95.2× 體積，後續亦可以水體所含氮與磷的去除情形作為指標，綜合評估合適的養豬放流水稀釋倍數 (Toyama *et al*. 2018)。

少根紫萍在濱海魚塭場域養殖的可行性

為評估少根紫萍量產的可行性，本研究在位於養豬場旁的濱海魚塭場域中，評估少根紫萍在濱海魚塭場域的生長，該魚塭底部不平且含有泥沙，並存在漏水問題。於每次養殖週期皆固定在較淺水處，定點量測高度，注水 70 cm 高後 1 wk，水位降至 15 cm，再 1 wk 後降至 11 cm，儘管如此，水面高度仍足夠養殖浮在水面上的浮萍。此外，由於場域靠近海邊，最大陣風可達 25 km h^{-1}，增強了池水的蒸發

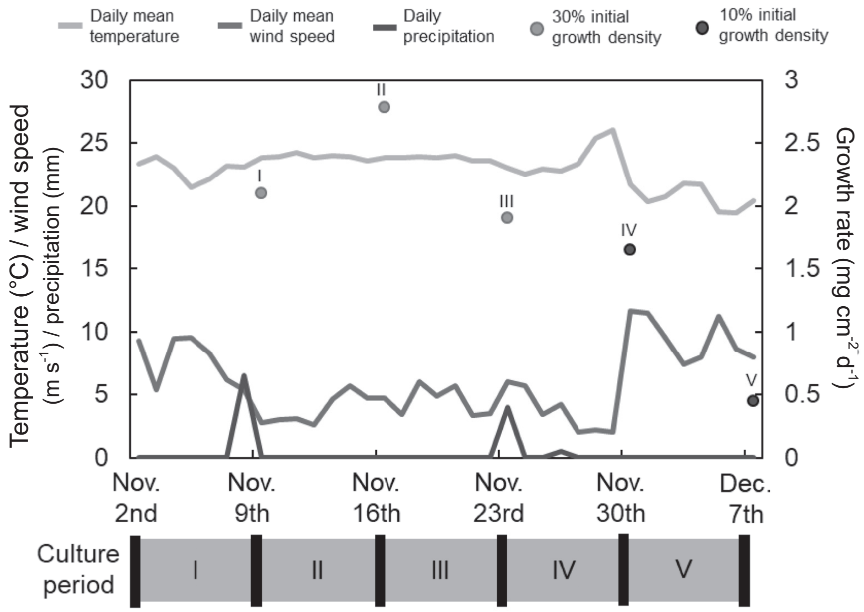

圖 7. 少根紫萍於濱海魚塭場域在 5 個養殖週期 (2022 年 11 月 2 日至 12 月 7 日) 的生長速率。各養殖週期 (I−V) 皆歷時 7 d。圖中以淺灰、中灰及深灰折線分別代表日均溫、日均風速及日降雨量的變化，而淺灰與深灰點則分別代表 30% 與 10% 的初始生長密度。

Fig. 7. The growth rate of *Landoltia punctata* in a coastal fish farm over 5 cultivation periods (November 2, 2022−December 7, 2022). Each cultivation period (I−V) lasted for 7 d. In this figure, light gray, medium gray, and dark gray polylines represent the changes in daily mean temperature, daily mean wind speed, and daily precipitation, respectively. Light gray and dark gray dots represent initial growth densities of 30% and 10%, respectively.

作用，進而減少水體體積，後續試驗可以監測水體蒸發量或 EC 值變化，釐清場域的蒸發作用強度。

該魚塭入口處為水泥斜坡，風大時浮萍會被吹上斜坡，繼而乾死，為此可考慮設置攔浮萍索，將浮萍固定在特定位置，避免其被風吹到斜坡上，或設置狹長且多水池的方式，搭配幫浦維持水體一定流速，並定期收穫植體，可避免強風使植體過度堆疊，導致無法有效利用場域的生長空間 (Mohedano *et al*. 2012; Chen *et al*. 2018b; Stadtlander *et al*. 2022)；另流水有助於維持水體氧氣濃度，或可減少浮萍生產過程中過高的 CH_4 排放量，而其他如 CO_2 與 N_2O 溫室氣體，相對未養殖浮萍場域而言，養殖浮萍場域的排放量較低 (Rabaey & Cotner 2022)。

為方便操作，將養豬放流水以 LGW 稀釋至適合少根紫萍生長的 100× 體積，於場域中養殖少根紫萍確實可行，儘管因水體 EC 值較高，少根紫萍的葉狀體有偏黃的現象，但於瀝水籃中投放 30% 初始生長面積的少根紫萍，1 wk 內仍可在 394.08 cm^2 的面積中以 282.4 kg ha^{-1} d^{-1} 的速率增長。未來擴大至以整座面積為 509.18 m^2 的魚塭場域進行量產時，若可以維持水體酸鹼偏中性與流動性及適宜的環境因素等特性，少根紫萍在養豬放流水中的增長速率應可達 830−1,810 kg ha^{-1} d^{-1} (Mohedano *et al*. 2012)。關於葉狀體顏色評估，後續可進一步以色卡檢視並定義葉面及葉背顏色，提供更精準的顏色描述，甚至分析葉狀體的葉綠素 a (chlorophyll a)、葉綠素 b (chlorophyll b) 及玉米黃素 (zeaxanthin) 等成分，瞭解葉狀體內色素的變化 (Muradov *et al*. 2014; Stewart *et al*. 2021)。雖然少根紫萍可以在高鹽分水體中生長，但仍以較低濃度營養情況下，可累積較多的生物量與澱粉含量，且最

佳生長光週期為 24 h 光照 (Liu *et al*. 2018)，所以場域中的 5 次養殖週期的光照時間，亦為變動因子之一。

浮萍於冬季養殖時，因風力、溫度及光照等問題，可預期產量低落，未來除可設計出更適合浮萍專業量產場域或複合式農畜水產養殖場域，甚至可在人造環境下調控光照強度，實現垂直多層式養殖農場，不僅可降低土地過度開發的疑慮，更達到少根紫萍的高效率量產目的 (Polutchko *et al*. 2022)。

未來商業化量產少根紫萍的應用性

少根紫萍因較容易吸收與利用 NH_4^+ 型式的氮 (Fang *et al*. 2007)，若能養殖於適當稀釋過且酸鹼偏中性的養豬放流水或其他事業廢水，則可藉植生復育法 (phytoremediation) 有效率地移除水體中過量的 NH_3-N，達到生物復育 (bioremediation) 的作用 (Zhou *et al*. 2023)。

在全球人口逐年上揚的過程，人類對蛋白質與能源的需求日益增加，如何達到聯合國通過的決議目標『讓世界走上永續與有彈性的道路』(United Nations 2015)，就須對糧食生產體系進行創新變革。為此昆蟲源、非傳統作物源及單細胞源蛋白等新興蛋白質的生產議題，已成為全球先進國家在農業科研的重要布局 (van der Spiegel *et al*. 2013)，而浮萍類植物屬於可生產植物性蛋白之非作物，可取代部分動物飼料中的大豆或玉米等作物蛋白 (Baek *et al*. 2021)，甚至依良好的生產規範，有潛力成為人類食品使用原料。Tian *et al*. (2021) 發現少根紫萍在 400 mg L^{-1} 的 NH_3-N 下生長時，雖不利於蛋白質的累積，卻可有效增加植體澱粉含量，其澱粉含量變多的特性便有利於生產生質燃料，尤其以少根紫萍作為原料生產乙醇或甲烷的能力，優於其他浮萍類植物，如小葉浮萍與腫浮萍 (Toyama *et al*. 2018)。上述少根紫萍友善生產與取代傳統作物等方面的應用，有利達到環境永續與消除飢餓的聯合國永續目標。

結論

本研究評估少根紫萍養殖於不同稀釋倍數之養豬放流水的耐受性與生長勢，以及初探其在濱海魚塭場域中生產的可行性。在以 RO 水稀釋的 SW-I 水樣中，EC 值與 pH 值隨時間增加而變化，且少根紫萍在 1–10× 體積稀釋之極高濃度的養豬放流水處理下無法正常生長，其葉狀體呈現缺綠或組織浸離。在以 LGW 稀釋的 SW-II 水樣中，植體鮮重在 40–200× 體積稀釋的養豬放流水處理間並無明顯差異，但在較高濃度的處理下部分葉狀體出現異常。在濱海魚塭場域中，投放 30% 初始生長面積的少根紫萍在日均溫較高且日均風速小的養殖週期 II 表現最佳。少根紫萍因能在高 EC 值與高營養水體中生長，適合淨化養豬放流水，故被視為生物復育中極具潛力的水生植物；若進一步利用此植體材料，可將其轉化為動物飼料或生質燃料原料，從而促進循環經濟的發展並達到環境永續。

誌謝

本研究承農業部 111 農科-14.3.1-農-C1 與 112 農科-4.4.1-農-C7 計畫經費補助，試驗期間承洪宗澤先生、朱雅琳小姐、李怡樺小姐及林怡君小姐協助相關試驗執行，海濱隆盛畜牧場林睿毅先生提供濱海魚塭場域，謹此致謝。

引用文獻

Azim, M. E. and M. A. Wahab. 2003. Development of a duckweed-fed carp polyculture system in Bangladesh. Aquaculture 218:425–438. doi:10.1016/s0044-8486(03)00012-7

Baek, G., M. Saeed, and H. K. Choi. 2021. Duckweeds: Their utilization, metabolites and cultivation. Appl. Biol. Chem. 64:73. doi:10.1186/s13765-021-00644-z

Brown, W. Y., M. Choct, and J. R. Pluske. 2013. Duckweed (*Landoltia punctata*) in dog diets decreases digestibility but improves stool consistency. Anim. Prod. Sci. 53:1188−1194. doi:10.1071/an13198

Chen, C. L., M. C. Lin, and C. Y. Liao. 2018a. Fertilization Essentials of Animal Husbandry Wastewater for Agricultural Land. Taiwan Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Taichung, Taiwan. 76 pp. (in Chinese)

Chen, G., Y. Fang, J. Huang, Y. Zhao, Q. Li, F. Lai, Y. Xu, X. Tian, K. He, Y. Jin, L. Tan, and H. Zhao. 2018b.

Duckweed systems for eutrophic water purification through converting wastewater nutrients to high-starch biomass: Comparative evaluation of three different genera (*Spirodela polyrhiza*, *Lemna minor* and *Landoltia punctata*) in monoculture or polyculture. RSC Adv. 8:17927−17937. doi:10.1039/c8ra01856a

Council of Agriculture. 2022. Basic Agricultural Statistics 2021. Council of Agriculture, Executive Yuan, ROC. Taipei, Taiwan. 64 pp.

Council of Agriculture. 2023. Report on the Number of Pigs Survey, End of Nov. 2022. Council of Agriculture, Executive Yuan, ROC. Taipei, Taiwan. 63 pp.

Damry, J. V. Nolan, R. E. Bell, and E. S. Thomson. 2001. Duckweed as a protein source for fine-wool Merino sheep: Its edibility and effects on wool yield and characteristics. Asian-Australas. J. Anim. Sci. 14:507–514. doi:10.5713/ajas.2001.507

Demann, J., F. Petersen, G. Dusel, M. Bog, R. Devlamynck, A. Ulbrich, H. W. Olfs, and H. Westendarp. 2023. Nutritional value of duckweed as protein feed for broiler chickens-digestibility of crude protein, amino acids and phosphorus. Animals 13:130. doi:10.3390/ani13010130

Devlamynck, R., M. F. de Souza, E. Michels, I. Sigurnjak, N. Donoso, C. Coudron, J. Leenknegt, P. Vermeir, M. Eeckhout, and E. Meers. 2021. Agronomic and environmental performance of *Lemna minor* cultivated on agricultural wastewater streams- A practical approach. Sustainability 13:1570. doi:10.3390/su13031570

El-Shafai, S. A., F. A. El-Gohary, J. A. J. Verreth, J. W. Schrama, and H. J. Gijzen. 2004. Apparent digestibility coefficient of duckweed (*Lemna minor*), fresh and dry for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). Aquac. Res. 35:574–586. doi:10.1111/j.1365-2109.2004.01055.x

Faizal, A., A. A. Sembada, and N. Priharto. 2021. Production of bioethanol from four species of duckweeds (*Landoltia punctata*, *Lemna aequinoctialis*, *Spirodela polyrrhiza*, and *Wolffia arrhiza*) through optimization of saccharification process and fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*. Saudi J. Biol. Sci. 28:294–301. doi:10.1016/j.sjbs.2020.10.002

Fang, Y. Y., O. Babourina, Z. Rengel, X. E. Yang, and P. M. Pu. 2007. Ammonium and nitrate uptake by the floating plant *Landoltia punctata*. Ann. Bot. 99:365–370. doi:10.1093/aob/mcl264

Goopy, J. P. and P. J. Murray. 2003. A review on the role of duckweed in nutrient reclamation and as a source of animal feed. Asian-Australas. J. Anim. Sci. 16:297–305. doi:10.5713/ajas.2003.297

Goopy, J. P., P. J. Murray, A. T. Lisle, and R. A. M. Al Jassim. 2004. Use of chemical and biological agents to improve water quality of effluent discharge from abattoirs. Asian-Australas. J. Anim. Sci. 17:137–145. doi:10.5713/ajas.2004.137

Gule, A. H., D. B. Derese, C. M. Erge, U. G. Girgo, and H. K. Ejeta. 2023. Effect of dietary supplementation of duckweed on growth performance, carcass and non-carcass traits of horro rams fed on a commercial-based diet. Heliyon 9:e17820. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e17820

Gutiérrez, K., L. Sanginés, F. Pérez, and L. Martinez. 2001. Studies on the potential of the aquatic plant *Lemna gibba* for pig feeding. Cuba. J. Agric. Sci. 35:343–348.

Gwaze, F. R. and M. Mwale. 2015. The prospect of duckweed in pig nutrition: A review. J. Agric. Sci. 7:189–199. doi:10.5539/jas.v7n11p189

Huang, H. 2008. Influence of climate condition on decontaminating swine wastewater by duckweed-cultured systems. J. Anhui Agric. Sci. 36:6946–6949. (in Chinese with English abstract)

Huang, Y. T. 2013. Field investigation on the treatment of partially-treated pigfarm wastewater by a constructed wetland. Master Thesis. Institute of Environmental Engineering, National Sun Yat-sen University. Kaohsiung, Taiwan. 98 pp. (in Chinese with English abstract)

Islam, K. M. S., M. Shahjalal, A. M. M. Tareque, and M. A. R. Howlider. 1997. Complete replacement of dietary fish meal by duckweed and soybean meal on the performance of broilers. Asian-Australas. J. Anim. Sci. 10:629–634. doi:10.5713/ajas.1997.629

Koh, M. T., C. H. Hsieh, M. P. Cheng, T. H. Hsiao, Y. F. Cheng, C. C. Su, C. L. Hu, and F. N. Chen. 2004. Investigation of effluent electrical conductivity from pig farms in central and southern Taiwan. J. Taiwan Livest. Res. 37:71–80. (in Chinese with English abstract)

Körner, S., S. K. Das, S. Veenstra, and J. E. Vermaat. 2001. The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*. Aquat. Bot. 71:71–78. doi:10.1016/S0304-3770(01)00158-9

Körner, S., J. E. Vermaat, and S. Veenstra. 2003. The capacity of duckweed to treat wastewater: Ecological considerations for a sound design. J. Environ. Qual. 32:1583–1590. doi:10.2134/jeq2003.1583

Leng, R. A., J. H. Stambolie, and R. Bell. 1995. Duckweed- A potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. Livest. Res. Rural. Dev. 7(1):5.

Lin, C. L. 2022. Lemnoideae of Taiwan, superficially familiar but not so if looking closely. Nat. Conserv. Q. 118:42–53. (in Chinese)

Lin, H. L., Y. L. Shiu, C. Y. Tsai, C. C. Chi, and C. H. Liu. 2015. Duckweed (*Lemna minor*), as a potential protein source for red tilapia (*Oreochromis* sp.). J. Fish. Soc. Taiwan 42:115–124. doi:10.29822/JFST.201506_42(2).0005

Lin, S. C. and T. K. Chang. 2015. Relationship between species of ionic equivalent concentrations and electrical conductivity in livestock wastewater. J. Taiwan Agric. Eng. 61:1–13. (in Chinese with English abstract) doi:10.29974/JTAE.201503_61(1).0001

Liu, Y., X. Wang, Y. Fang, M. Huang, X. Chen, Y. Zhang, and H. Zhao. 2018. The effects of photoperiod and nutrition on duckweed (*Landoltia punctata*) growth and starch accumulation. Ind. Crops Prod. 115:243–249. doi:10.1016/j.indcrop.2018.02.033

Mohedano, R. A., V. F. Velho, R. H. R. Costa, S. M. Hofmann, and P. Belli Filho. 2012. Nutrient recovery from swine waste and protein biomass production using duckweed ponds (*Landoltia punctata*): Southern Brazil. Water Sci. Technol. 65:2042–2048. doi:10.2166/wst.2012.111

Mohedano, R. A., R. H. R. Costa, S. M. Hofmann, and P. Belli Filho. 2014. Using full-scale duckweed ponds as the finish stage for swine waste treatment with a focus on organic matter degradation. Water Sci. Technol. 69:2147–2154. doi:10.2166/wst.2014.136

Moss, M. E. 1999. Economics and feed value of integrating duckweed production with a swine operation. Master Thesis. Department of Animal Science, Texas Tech University. Lubbock, TX. 79 pp.

Muradov, N., M. Taha, A. F. Miranda, K. Kadali, A. Gujar, S. Rochfort, T. Stevenson, A. S. Ball, and A. Mouradov. 2014. Dual application of duckweed and azolla plants for wastewater treatment and renewable fuels and petrochemicals production. Biotechnol. Biofuels 7:30. doi:10.1186/1754-6834-7-30

Mwale, M. and F. R. Gwaze. 2013. Characteristics of duckweed and its potential as feed source for chickens reared for meat production: A review. Sci. Res. Essays 8:689–697. doi:10.5897/SREX12.003

Polutchko, S. K., J. J. Stewart, M. McNamara, N. Doherty Garcia, M. López-Pozo, W. W. Adams, and B. Demmig-Adams. 2022. *Lemna* as a sustainable, highly nutritious crop: Nutrient production in different light environments. Nutraceuticals 2:350–364. doi:10.3390/nutraceuticals2040027

Rabaey, J. and J. Cotner. 2022. Pond greenhouse gas emissions controlled by duckweed coverage. Front. Environ. Sci. 10:889289. doi:10.3389/fenvs.2022.889289

Sońta, M., A. Rekiel, and M. Batorska. 2019. Use of duckweed (*Lemna* L.) in sustainable livestock production and aquaculture- A review. Ann. Anim. Sci. 19:257–271. doi:10.2478/aoas-2018-0048

Stadtlander, T., J. Bandy, D. Rosskothen, C. Pietsch, F. Tschudi, M. Sigrist, A. Seitz, and F. Leiber. 2022. Dilution rates of cattle slurry affect ammonia uptake and protein production of duckweed grown in recirculating systems. J. Clean. Prod. 357:131916. doi:10.1016/j.jclepro.2022.131916

Stewart, J. J., W. W. Adams, M. López-Pozo, N. Doherty Garcia, M. McNamara, C. M. Escobar, and B. Demmig-Adams. 2021. Features of the duckweed *Lemna* that support rapid growth under extremes of light intensity. Cells 10:1481. doi:10.3390/cells10061481

Su, T. M., C. H. Chung, T. H. Hsiao, and M. P. Cheng. 2020. Treatment effects of three-step treatment on pig wastewater with different concentrations. J. Taiwan Livest. Res. 53:82–90. (in Chinese with English abstract) doi:10.6991/JTLR.202006_53(2).0003

Tallentire, C. W., S. G. Mackenzie, and I. Kyriazakis. 2018. Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? J. Clean. Prod. 187:338–347. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.212

Tian, X., Y. Fang, Y. Jin, Z. Yi, J. Li, A. Du, K. He, Y. Huang, and H. Zhao. 2021. Ammonium detoxification mechanism of ammonium-tolerant duckweed (*Landoltia punctata*) revealed by carbon and nitrogen metabolism under ammonium stress. Environ. Pollut. 277:116834. doi:10.1016/j.envpol.2021.116834

Toyama, T., T. Hanaoka, Y. Tanaka, M. Morikawa, and K. Mori. 2018. Comprehensive evaluation of nitrogen removal rate and biomass, ethanol, and methane production yields by combination of four major duckweeds and three types of wastewater effluent. Bioresour. Technol. 250:464–473. doi:10.1016/j.biortech.2017.11.054

Tsai, C. Y. 2019. Evaluation of duckweed (*Lemna minor*) meal as protein source for red tilapia (*Oreochromis* sp.) and applying the recombinant xylanases from *Bacillus subtilis* E20 to improve the utilization of duckweed meal. Doctoral Dissertation. Department of Aquaculture, National Pingtung University of Science and Technology. Pingtung, Taiwan. 74 pp. (in Chinese with English abstract) doi:10.6346/NPUST201900241

Tsai, M. C. and C. Y. Chou. 2005. Biological nutrient removal for swine wastewater. J. Agric. Mach. 14(4):1–12. (in Chinese with English abstract) doi:10.30062/JAM.200512.0001

United Nations. 2015. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. United Nations General Assembly. New York, NY. 35 pp.

van der Spiegel, M., M. Y. Noordam, and H. J. van der Fels-Klerx. 2013. Safety of novel protein sources (insects, microalgae, seaweed, duckweed, and rapeseed) and legislative aspects for their application in food and feed production. Compr. Rev. Food. Sci. Food Saf. 12:662–678. doi:10.1111/1541-4337.12032

Verspagen, J. M. H., D. B. Van de Waal, J. F. Finke, P. M. Visser, E. Van Donk, and J. Huisman. 2014. Rising CO2 levels will intensify phytoplankton blooms in eutrophic and hypertrophic lakes. PLoS One 9:e104325. doi:10.1371/journal.pone.0104325

Wang, W., Y. Wu, Y. Yan, M. Ermakova, R. Kerstetter, and J. Messing. 2010. DNA barcoding of the *Lemnaceae*, a family of aquatic monocots. BMC Plant Biol. 10:205. doi:10.1186/1471-2229-10-205

Wu, C. I., Y. Y. Juang, Y. H. Lee, and T. H. Shyu. 2009. Toxicity tests of six heavy metals using two common duckweeds in Taiwan. Plant Prot. Bull. 51:69–82. (in Chinese with English abstract) doi:10.6715/ppb.200912_51(3_4).0001

Yang, Y. P. 2000. Lemnaceae. p.695–697. *in*: Flora of Taiwan. 2nd ed. Vol. 5. (Boufford, D. E., C. F. Hsieh, T. C. Huang, C. S. Kuoh, H. Ohashi, H. J. Su, H. Y. Yeh, J. L. Hsiao, and S. H. Hsiao, eds.) Department of Botany, National Taiwan University. Taipei, Taiwan. 1144 pp.

Yu, B. 2010. Studies on effects of duckweed on removal of nitrogen and phosphorus from polluted water bodies. Master Thesis. Institute of Plant Nutrition, Yangzhou University. Yangzhou, China. 73 pp. (in Chinese with English abstract)

Zhou, Y., A. Stepanenko, O. Kishchenko, J. Xu, and N. Borisjuk. 2023. Duckweeds for phytoremediation of polluted water. Plants 12:589. doi:10.3390/plants12030589

Growth Evaluation of Dotted Duckmeat (*Landoltia punctata*) Cultivated in Swine Wastewater

Bo-Wen Lin[1], Shu-Chen Chang[2,*], Yahn-Chir Lee[3], Chi-Ling Chen[4], and Hsien-Tzung Shih[5]

Abstract

Lin, B. W., S. C. Chang, Y. C. Lee, C. L. Chen, and H. T. Shih. 2023. Growth evaluation of dotted duckmeat (*Landoltia punctata*) cultivated in swine wastewater. J. Taiwan Agric. Res. 72(4):317–332.

Duckweed, a plant rich in protein contents, is commonly used for wastewater purification in various industries, livestock farming, food processing, and domestic applications because it can effectively remove nitrogen and phosphorus from water bodies. In this study, we evaluated the growth performance of dotted duckmeat (*Landoltia punctata*) cultivated in swine wastewater (SW-I and SW-II) and investigated its growth rate in a potential coastal fish farm setting. In the tolerance assessment, dotted duckmeat was cultivated in SW-I diluted with different volumes of reverse osmosis (RO) water, resulting in a 27−52% reduction in SW-I electrical conductivity (EC) and an increase in pH to 9.1–9.9 after one week. SW-I at 40× dilution in RO water significantly promoted the growth of dotted duckmeat, by increasing its fresh weight by 1.7 times. When local groundwater with an EC value of 1,696 μS cm^{-1} was used to dilute SW-II into different volumes for cultivation experiments, it was predicted that the best fresh weight would be achieved at 70.6 times the volume of SW-II. Moreover, at 109.9 times the volume of SW-II, the healthy leaf area percentage reached 92.5%, comparable to dotted duckmeat cultivated in pure groundwater. When different quantities of dotted duckmeat were introduced into drainage baskets in a coastal fish farm, the best growth performance was observed when 30% of the initial growth area was added during cultivation period II, with a growth rate reaching 2.8 mg cm^{-2} d^{-1} within 1 wk, especially in periods characterized by higher daily mean temperatures and lower daily mean wind speeds. These results provide valuable insights into the future commercial production of dotted duckmeat, with potential applications in animal feed and biofuel production.

Key words: Duckweed, Circular agriculture, Bioremediation, Alternative proteins.

Received: July 28, 2023; Accepted: October 2, 2023.
[*] Corresponding author, e-mail: scchang@tari.gov.tw
[1] Assistant Research Fellow, Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[2] Associate Research Fellow, Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[3] Assistant Research Fellow, Agricultural Chemistry Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[4] Research Fellow, Agricultural Chemistry Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.
[5] Research Fellow and Division Director, Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.